

**В.Д. Бурлаков, В.В. Зуев, Г.С. Евтушенко, А.В. Ельников, В.Н. Маричев, В.Л. Правдин**

## **ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ**

Обсуждаются возможности использования лазеров на парах металлов в лидарных системах для дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля. В частности, данные о спектре размеров аэрозольных частиц, полученные с помощью многочастотного лидара с использованием лазеров на парах металлов, позволяют проводить аэрозольную коррекцию одновременно измеренных профилей концентрации озона. Приводится описание стационарного лидара на базе лазера на парах меди для зондирования пространственного распределения промышленных аэрозолей над промышленным центром.

### **1. Введение**

Изменение естественной аэрозольной концентрации как в тропосфере, так и в стратосфере, оказывает сильное влияние на распространение оптического излучения, радиационный баланс, на содержание молекулярных составляющих атмосферы, включая озон; на другие процессы взаимодействия «земля–атмосфера», определяющие погодообразование и климат. Поэтому динамика аэрозоля, его суточные и сезонные вариации, высотное и региональное распределение представляют большой интерес для метеорологов, климатологов, специалистов по атмосферной оптике. В пределах крупных промышленных центров необходимы комплексные исследования загрязнения атмосферы аэрозолями промышленного происхождения.

Оперативный как локальный, так и крупномасштабный систематический контроль аэрозольного состояния атмосферы обеспечивает лидарный метод зондирования аэрозолей [1]. При этом при одночастотном лазерном зондировании из отраженного атмосферой сигнала может быть восстановлен профиль коэффициента ослабления и оценена концентрация аэрозоля при использовании некоторых моделей атмосферы и априорных данных о ней. Расширение объема измерительной информации за счет зондирования на нескольких длинах волн [2] позволяет решить комплексную задачу исследования атмосферного аэрозоля – определение спектра размеров частиц и показателя преломления вещества, из которого они состоят, т.е. химический состав аэрозоля.

Обычно для зондирования аэрозолей используются мощные импульсные твердотельные лазеры с энергией в импульсе от десятков до сотен миллиджоулей и с частотами следования единицы-десятки герц. Регистрация эхосигнала от верхней тропосферы и стратосферы ведется на высокочувствительные ФЭУ в режиме счета фотонов. При этом вследствие засветки ФЭУ мощным отраженным сигналом от ближней зоны зондирования возникает эффект последствия ФЭУ, который ведет к просчету фотонов в большом динамическом диапазоне лидарных эхосигналов и искажению всей формы сигнала. Поэтому для высотного зондирования возможно использование лазерных источников с меньшей энергией в импульсе, но с большей ( $\sim$  кГц) частотой следования импульсов, что обеспечивает малые времена (несколько минут) накопления сигнала в режиме счета фотонов. Таким требованиям отвечают некоторые лазеры на парах металлов (ЛПМ).

Лидарные системы на основе лазеров на парах меди и золота использовались для измерения вертикальных профилей распределения аэрозолей в тропосфере и стратосфере [3, 4]. Лазер на парах меди используется в лидарах, работающих на основе эффекта комбинационного рассеяния света, для измерения профилей влажности и температуры в нижней тропосфере [5]. В [6] описан лидар с лазером на парах меди для исследования аэрозольного и молекулярного рассеяния по доплеровскому уширению линий.

Генерация на парах металлов реализована в большом спектральном диапазоне, поэтому можно выбрать ряд лазерных источников для многочастотного зондирования микрофизических параметров аэрозолей. Исходя из типичных размеров аэрозольных частиц, многочас-

тотное зондирование необходимо проводить в спектральном интервале 0,3–1,5 мкм. Учитывая, что в области, большей 0,8 мкм, нет высокочувствительных счетных ФЭУ, нами выбраны для многочастотного зондирования аэрозолей следующие лазеры на парах металлов: Sr<sup>+</sup> – 430,5, Cu – 510,6, Au – 627,8, Pb – 722,9 нм.

В этих лазерах реализуется средняя мощность генерации 1–2 Вт при частоте следования 2,5 кГц (что соответствует максимальной дальности зондирования 60 км) и при необходимой расходимости излучения 0,2–0,3 мрад в неустойчивом резонаторе. Использование этих лазеров в составе многочастотного лидара значительно расширяет его функциональные возможности, в частности, позволяет проводить «аэрозольную коррекцию» профилей концентрации озона.

## 2. Использование ЛПМ в многочастотном лидаре на базе приемного телескопа с диаметром 2,2 м для одновременного зондирования вертикального распределения озона и аэрозоля в стратосфере

Лазерное зондирование озона осуществляется, как правило, в УФ-диапазоне спектра в полосах поглощения Хартли и Хиггинса лидарным методом дифференциального поглощения. Поскольку УФ-полосы поглощения озона не имеют выраженной селективной структуры, длины волн зондирования приходится выбирать сильно разнесенными по спектру. В этом случае при восстановлении профиля озона из данных лидарного зондирования необходимо учитывать, что спектральные вариации коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния в таком спектральном интервале могут оказаться значительными. В тропосфере, особенно в нижней части, из-за высокого содержания в ней аэрозолей разной природы и состава такая ситуация – обычное явление. Для стратосферы она реализуется, как правило, только после извержения мощных вулканов, выбрасывающих в стратосферу огромное количество аэрозолей и разных газов, которые способствуют дополнительному формированию стратосферного аэрозоля. В настоящее время, как известно, наблюдается сильное аэрозольное возмущение стратосферы продуктами извержения вулкана Пинатубо, происшедшего на Филиппинах в июне 1991 г. [7]. Поэтому проблемы аэрозольной коррекции лазерного зондирования озона одинаково актуальны сегодня не только для тропосферы, но и для стратосферы.

Для осуществления «аэрозольной коррекции» необходимы знания о микроструктуре атмосферного аэрозоля, которые можно получить из данных многочастотного лазерного зондирования аэрозолей, полученных одновременно с данными озонного зондирования.

С этой целью мы создали многочастотный лидар на базе большого приемного телескопа с диаметром 2,2 м и многоволновой лазерной передающей системы. Подробное описание блок-схемы и технических характеристик системы приведены в [8]. В качестве базовых лазеров используются эксимерный XeCl-лазер и вторая гармоника Nd:YAG-лазера. В совокупности с использованием ВКР-преобразования излучения лазеров накачки в водороде зондирование может осуществляться одновременно на длинах волн 308, 353, 532 и 683 нм. Имеется возможность расширения диапазона зондирующих длин волн за счет использования лазеров на парах меди, золота, свинца и иона стронция. Многочастотный и многоканальный режим работы лидара позволяет вести одновременную регистрацию вертикальных профилей распределения озона, аэрозоля и спектра размеров аэрозольных частиц.

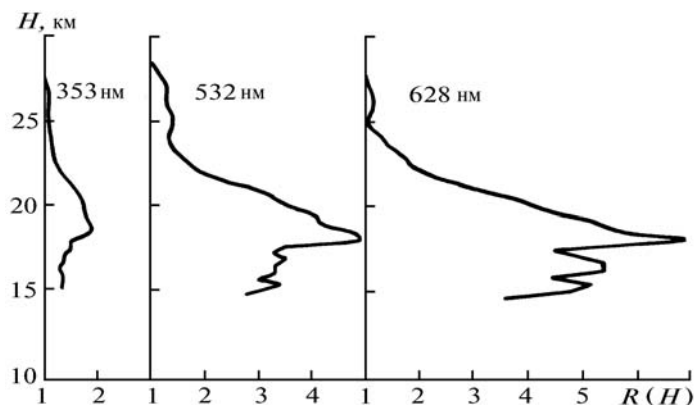


Рис. 1. Высотные профили отношения рассеяния

На рис. 1 приведен пример одновременного зондирования атмосферы с помощью описанного лидара ночью 27 апреля 1992 г. Использовались четыре длины волны зондирования 308, 353, 532, 628 нм от ХеСl-лазера с ВКР-ячейкой, Nd:YAG-лазера и Аи-лазера. На рис. 1 изображены полученные профили отношения рассеяния  $R(H)$ , показывающие характерную для настоящего времени аэрозольную ситуацию в стратосфере, обусловленную ее аэрозольным возмущением продуктами извержения вулкана Пинатубо.

$$R(H) = \frac{\beta_a(H) + \beta_M(H)}{\beta_M(H)},$$

где  $H$  – расстояние;  $\beta_a(H)$  – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния,  $\beta_M(H)$  – коэффициент обратного молекулярного рассеяния.

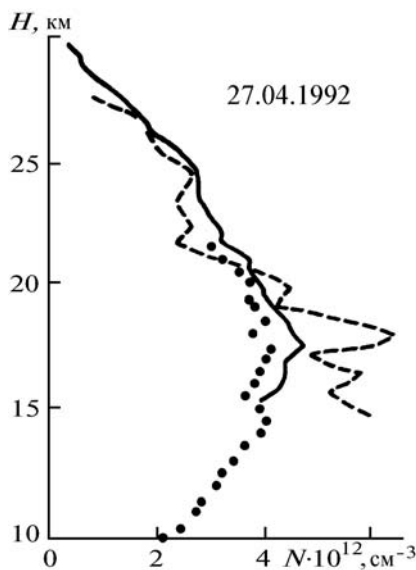


Рис. 2. Профили концентрации  $N$  озона

На рис. 2 штриховой линией изображен профиль озона, восстановленный по обычной схеме дифференциального поглощения при зондировании только на 2-х длинах волн 308 и 353 нм. Точками на этом рисунке обозначены данные озонозонда, полученные одновременно с данными лидарного зондирования. Налицо полное несоответствие озонозондового и лидарного профилей озона. Сплошной линией на рис. 2 изображен профиль озона, восстановленный с учетом аэрозольной коррекции. Видно, что эти данные неплохо согласуются с озонозондовыми.

Безусловно, создание многоканального лидара связано не столько с необходимостью аэрозольной коррекции данных озонowego лидарного зондирования стратосферы, сколько с получением детальной информации о микроструктуре стратосферного аэрозоля, выявлением взаимодействия озона и аэрозоля стратосферы и рядом других задач, чему будет способствовать использование всего комплекса выбранных ЛПМ.

### 3. Лидар на основе лазера на парах меди для зондирования промышленных аэрозолей

Для контроля общей экологической обстановки над промышленным районом, для диагностики шлейфов аэрозольных аварийных и систематических выбросов, для выбора новых районов промышленной и жилой застройки в черте города и его окрестностях при сохранении допустимых норм загрязнения среды необходимы оперативные методы и средства контроля поступления загрязняющих веществ в атмосферу от промышленных предприятий. Лидар на основе лазера, работающего с большой частотой следования импульсов ( $\sim$  кГц), позволяет решить подобную задачу при обеспечении дальности зондирования по горизонтальной трассе до расстояний  $\sim$  10 км. В этом случае, располагая лидар на возвышенной точке или используя мобильный лидар, можно оперативно снимать общую аэрозольную ситуацию над городом.

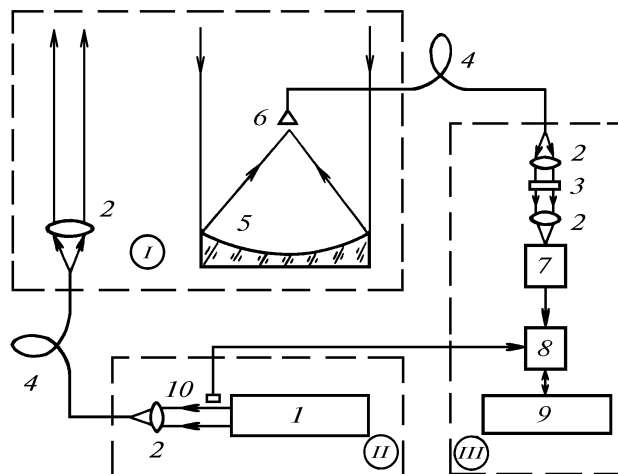


Рис. 3. Блок-схема лидара: 1 – ЛПИМ; 2 – линзы; 3 – интерференционный фильтр; 4 – световоды; 5 – приемное зеркало ( $\varnothing = 500$ ,  $F = 1500$  мм); 6 – фокус; 7 – ФЭУ-130; 8 – счетчик фотонов; 9 – компьютер; 10 – запускающий фототранзистор

На рис. 3 приведена упрощенная блок-схема лидара. Лидар выполнен в виде стационарного комплекса. Оптико-механическая приемно-передающая часть лидара 1 представляет собой единое целое и установлена на сканирующей колонке, обеспечивающей угол сканирования по азимуту от 0 до 360° и углу места от 0 до 90°. Сканирующая колонка размещена на крыше 4-этажного здания, которое, в свою очередь, расположено на значительном возвышении за городом. Благодаря этому имеется возможность производить зондирование над всей площадью города по горизонтальным и наклонным трассам. Блок лазерных источников (II) и блок электронной регистрирующей и обрабатывающей аппаратуры (III) расположены в отдельной комнате здания, что значительно упрощает работу операторов. Передача оптического излучения от блока II к блоку I осуществляется по моноволоконным кварцевым световодам рабочим диаметром 1 мм. Передача оптического сигнала от фокуса приемного зеркала к ФЭУ осуществляется при помощи фокона, оптически склеенного или сваренного со световодом. Коэффициент светопередачи системы фокон-световод составляет ~ 50%.

Использование световодов для передачи лазерного излучения позволяет производить быструю замену лазерного источника в зависимости от решаемой задачи, не нарушая взаимной юстировки приемно-передающей оптики. В частности, это позволяет использовать несколько лазерных источников с различными длинами волн, обеспечивающими многочастотное зондирование, и затем по химическому составу аэрозольных выбросов идентифицировать источник загрязнения.

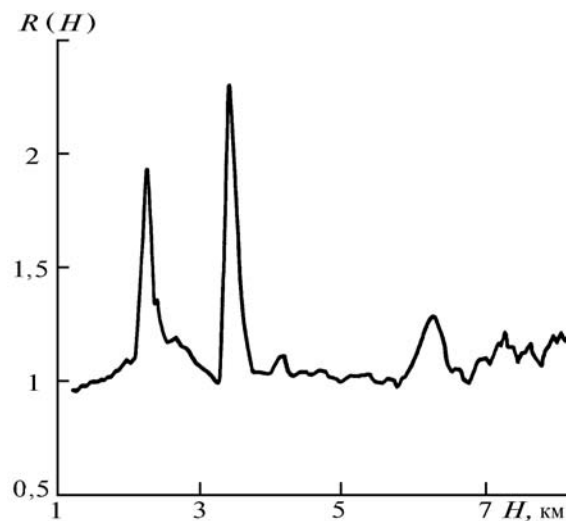


Рис. 4. Горизонтальный профиль отношения рассеяния  
Лазеры для зондирования атмосферного аэрозоля

Для иллюстрации работоспособности рассматриваемого лидара на рис. 4 приведено отношение рассеяния  $R(H)$ , полученное при зондировании на длине волны 510,6 нм лазера на парах меди по одной из горизонтальных трасс над г. Томском и характеризующее содержание в атмосфере аэрозольной и молекулярной составляющих. На расстояниях 2,5; 3,5 и 6,5 км регистрируются всплески аэрозольного сигнала, хорошо коррелирующие с расположенными по трассе промышленными объектами и дымовыми шлейфами.

Уверенный прием эхосигналов наблюдается до расстояний 10 км. Отметим, что параметры лидарной системы были при этом не оптимизированы. Для уменьшения засветок ФЭУ от ближней зоны энергия лазерных импульсов была почти на порядок меньше возможной. Средняя мощность генерации на зеленой линии составляла 1 Вт при частоте следования импульсов 5 кГц. Расходимость луча, вышедшего в атмосферу, которая определяется рабочим диаметром световода и фокусным расстоянием коллимирующей линзы, составляла  $3 \cdot 10^{-3}$  рад. Угол поля зрения приемной системы был сравним с этой величиной. Расходимость вышедшего излучения можно значительно уменьшить за счет применения для передачи излучения световода меньшего диаметра и длиннофокусной коллимирующей оптики. Таким образом, при изменении энергетических и геометрических параметров лидара имеется возможность значительного увеличения дальности зондирования.

В заключение авторы выражают благодарность С.Л. Бондаренко, А.Г. Филонову, Н.А. Филоновой и Е.В. Шарбарину за помощь в проведении экспериментов.

1. Лазерный контроль атмосферы /Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. С. 91–174.
2. Наац И. Э. Теория многочастотного лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1980. 149 с.
3. Стоянов Д.В., Дончев А.К., Коларов Г.В. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 4. С. 109–116.
4. Коларов Г.В., Стоянов Д.В., Мицев Ц.А. и др. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 125–126.
5. Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E. et al. //Appl. Optics. 1983. V. 22. P. 2984.
6. Grund C., Eloranta E. //Improvements in the High Resolution lidar System. 12-Int. Laser Radar Conf. Aug. 1984. France.
7. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В. и др. //Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 6. С. 602–604.
8. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В. и др. //Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 9. С. 1022–1027.

Институт атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
21 декабря 1992 г.

V.D. Burlakov, V.V. Zuev, G.S. Evtushenko, A.V. El'nikov, V.N. Marichev, V.L. Pravdin. **Metal-Vapor Lasers for Applications to Sensing the Atmospheric Aerosol.**

Possibilities of using the metal-vapor lasers in lidar systems for remote sounding of atmospheric aerosol are discussed. It is shown, in particular, that data on the aerosol size spectra which could be obtained with a metal-vapor-lasers-based lidar would allow one to correct simultaneously acquired data on the ozone density profile for the atmospheric aerosol. A description of a stationary Cu-vapor-laser-based lidar for detecting spatial distribution of industrial aerosols in the atmosphere over an industrial center is presented.